

УДК 628.971

Ю. О. Васильева, канд. техн. наук,

Е. Н. Ляшенко

Харьковская национальная академия
городского хозяйства

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТОВ ОСВЕЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. Чтобы получить реалистичное отображение сцены, нужно сгенерировать перспективные проекции объектов и применить эффекты естественного освещения видимых поверхностей. Для расчета цвета освещенной точки на поверхности объекта используется *модель освещения*, также иногда называемая *моделью затенения* [1, 4]. Расчет цвета по модели освещения используется в *методе визуализации поверхностей* для определения цвета пикселей, в которые переходят все спроектированные точки сцены. Модель освещения можно применить к любой точке. Визуализация поверхности выполняется путем интерполяции цветов поверхностей в модели освещения с помощью несложных вычислений. Алгоритмы строк развертки в пространстве изображений обычно реализуют схемы интерполяции, тогда как алгоритмы построения хода лучей могут в каждом пикселе вызывать модели освещения [3]. Иногда процедуру визуализации поверхности называют *методом затенения*, рассчитывающим цвета поверхности с использованием модели затенения, но это может привести к путанице между указанными двумя терминами. Чтобы избежать неудобств, вызванных использованием сходной терминологии, будем называть модель расчета интенсивности света в отдельной точке поверхности *моделью освещения*, а термин *визуализация поверхности* будет означать применение модели освещения для получения цветов пикселей, в которые проектируются точки поверхности.

Вообще, моделирование эффектов освещения, наблюдаемых на объекте, является сложным процессом, в котором задействованы принципы, относящиеся как к физике, так и к физиологии [2]. По сути, эффекты освещения описываются моделями, в которых рассматривается взаимодействие электромагнитной энергии с поверхностью объекта на сцене. Свет, попадая в глаза, инициирует процесс восприятия, который и определяет, что в действительности мы "видим". Физические модели освещения включают множество таких факторов, как свойства материала, положение объекта относительно источников света и других объектов, а также свойства источников света [1, 2]. Объекты могут быть сделаны из непрозрачных материалов или быть в какой-то степени прозрачными. Кроме того, они могут иметь блестящие или матовые поверхности, а также содержать различные текстурные узоры. Для освещения сцены могут использоваться источники света, имеющие различные формы, цвета и положения. Для заданных оптических свойств поверхностей, относительного положения поверхностей на сцене, цвета и положения источников света, характеристик источников света и положения и ориентации плоскости наблюдения модель освещения позволяет рассчитать интенсивность света, исходящего из определенной точки поверхности в заданном направлении наблюдения.

Модели освещения в компьютерной графике часто представляют собой аппроксимации законов физики, описывающих эффекты освещения поверхности. Чтобы сократить объем вычислений, в большинстве пакетов используются эмпирические модели, основанные на упрощенных фотометрических расчетах. В таких более точных моделях, как алгоритмы

диффузного отражения, для вычисления интенсивности света рассматривается распространение энергии излучения от источника света до различных поверхностей сцены.

Обычно все светоизлучающие объекты в стандартной модели освещения — это точечные источники. Однако многие графические пакеты предлагают дополнительные функции для работы с направленным светом (прожектором) и неточечными источниками света.

На основе модели освещенности можно определить интенсивность поверхности в любом спроектированном положении пикселя. Кроме того, модель освещенности можно применить к нескольким выбранным точкам и аппроксимировать интенсивность в других точках поверхности. В графических пакетах поверхности обычно визуализируются с помощью алгоритмов строк развертки, сокращающих время обработки, поскольку в них используются только многоугольные поверхности, а расчет интенсивностей производится только в вершинах этих многоугольников. Затем интенсивности вершин интерполируются на другие точки многоугольной поверхности. Разработаны и другие, более точные методы визуализации многоугольников по строкам развертки, а в алгоритмах построения хода лучей для криволинейных или плоских поверхностей рассчитывается интенсивность в каждой спроектированной точке поверхности.

В данной работе представлен детальный анализ существующих методик получения фотореалистичных изображений с целью определения наиболее приемлемого для реализации в режиме реального времени метода визуализации эффектов освещения поверхности при выполнении различных светотехнических проектов.

Рассмотрим схемы визуализации поверхностей по строкам развертки, которые применяются к многоугольникам.

Визуализация поверхностей постоянной интенсивности. Простейший метод визуализации многоугольной поверхности — это присвоить определенный цвет всем спроектированным точкам поверхности. В этом случае на основе модели освещенности определяются интенсивности трех RGB-компонентов цвета в такой отдельной точке поверхности, как вершина или центр масс многоугольника [1]. Данный подход, называемый *визуализацией поверхностей постоянной интенсивности* или *визуализацией плоских поверхностей*, предлагает быстрый и простой метод отображения многоугольных граней объекта, что может быть использовано для быстрого получения общего внешнего вида криволинейной поверхности, подобной изображенной на рис. 1, б. Плоская визуализация также полезна в проектировании или других приложениях, где может потребоваться быстро обозначить отдельные многоугольные грани, использованные для моделирования криволинейной поверхности.

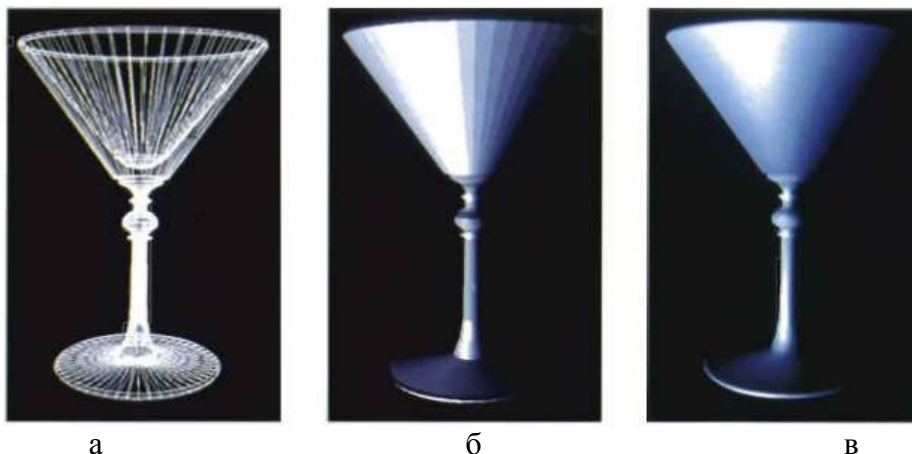


Рис. 1 - Аппроксимация объекта многоугольной сеткой (а) отображена с использованием визуализации плоских поверхностей (б) и визуализации Гуро (в)

Вообще, визуализация плоских поверхностей многоугольника позволяет точно отобразить поверхность, если справедливы все следующие предположения.

- Многоугольник является одной гранью многогранника, а не сегментом аппроксимирующей сетки криволинейной поверхности.
- Все источники, освещающие многоугольник, расположены достаточно далеко от поверхности, так что $N \cdot L$ и функция затухания равны константе на поверхности многоугольника.
- Точка наблюдения достаточно удалена от многоугольника, так что произведение $V \cdot R$ постоянно по области многоугольника.

Даже если некоторые из этих условий не выполняются, эффекты освещения поверхности все еще можно описать в разумном приближении, используя визуализацию поверхностей постоянной интенсивности, если грани объекта-многогранника малы.

Визуализация поверхностей по методу Гуро. Данная схема, разработанная Генри Гуро (Henri Gouraud) и называемая *визуализацией поверхностей по Гуро* или *визуализацией поверхности с интерполяцией интенсивности*, линейно интерполирует значения интенсивностей в вершинах многоугольных граней освещенного объекта. Метод Гуро [3, 4], разработанный для визуализации криволинейных поверхностей, аппроксимированных многоугольной сеткой, дает гладкие переходы значений интенсивности для каждой многоугольной грани в значения интенсивностей смежных многоугольников, имеющих с данным общие стороны. Названная интерполяция интенсивностей по области многоугольника устраняет разрывы интенсивности, которые могут появиться при плоской визуализации поверхностей.

Каждый сегмент многоугольника мозаичной криволинейной поверхности обрабатывается методом Гуро с использованием следующих процедур.

1. Определить средний единичный вектор нормали в каждой вершине многоугольника.
2. Применить модель освещенности к каждой вершине многоугольника, чтобы получить интенсивность света в этой точке.
3. Линейно интерполировать интенсивности вершин по спроектированной области многоугольника.

В каждой вершине многоугольника вектор нормали вычисляется как среднее векторов нормали всех многоугольников сетки поверхности, содержащих эту вершину (рис. 2). Следовательно, для любой вершины V единичный вектор нормали рассчитывается так:

$$N_v = \frac{\sum_{k=1}^n N_k}{\left| \sum_{k=1}^n N_k \right|}, \quad (1)$$

После вычисления вектора нормали в вершине мы обращаемся к модели освещенности и получаем интенсивность поверхности в этой точке.

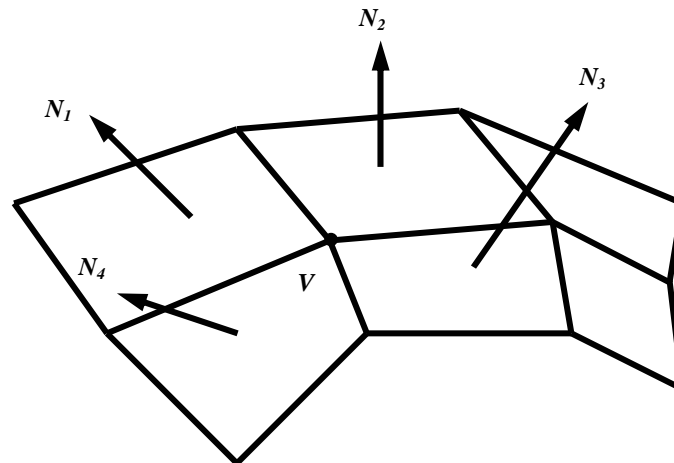


Рис. 2 - Определение вектора нормали для различных участков поверхности

Вектор нормали в вершине V (рис. 2) вычисляется как среднее нормалей поверхности для каждого многоугольника, содержащего эту вершину.

Вычислив по многоугольной сетке интенсивности всех вершин и интерполируя эти значения, можно найти интенсивности в точках вдоль строк развертки, пересекающих спроектированную область многоугольника, как показано на рис. 3.

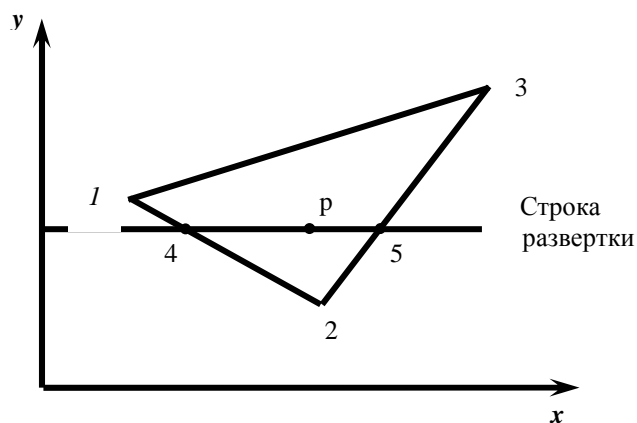


Рис. 3 - К определению интенсивности по методу Гуро

На рис. 3 при визуализации поверхностей по методу Гуро интенсивность в точке 4 является линейной интерполяцией интенсивностей вершин 1 и 2. Интенсивность в точке 5 определяется линейной интерполяцией интенсивностей вершин 2 и 3. Внутренняя точка p получает значение интенсивности, являющееся линейной интерполяцией интенсивностей в точках 4 и 5.

Для каждой строки развертки интенсивность в точке пересечения строки развертки со стороной многоугольника линейно интерполируется по интенсивностям в концах этой стороны. В примере, приведенном на рис. 3, сторона многоугольника с конечными вершинами в точках 1 и 2 пересекается строкой развертки в точке 4. Чтобы быстро получить интенсивность в точке 4, нужно интерполировать значения в вершинах 1 и 2, используя только вертикальное смещение строки развертки:

$$I_4 = \frac{y_4 - y_2}{y_1 - y_2} I_1 + \frac{y_1 - y_4}{y_1 - y_2} I_2, \quad (2)$$

В этом выражении символ I представляет интенсивность одного из RGB-компонентов цвета. Подобным образом, интенсивность в правой точке пересечения с этой строкой развертки (точка 5) интерполируется по значениям интенсивности в вершинах 2 и 3. Зная эти две граничные интенсивности, можно с помощью линейной интерполяции получить интенсивности пикселей во всех точках вдоль строки развертки. Интенсивность одного RGB-компонента цвета в точке p на рис. 3, например, рассчитывается по интенсивностям в точках 4 и 5:

$$I_p = \frac{x_5 - x_p}{x_5 - x_4} I_4 + \frac{x_p - x_4}{x_5 - x_4} I_5, \quad (3)$$

При визуализации по Гуро расчет интенсивности, представленный уравнениями (2) и (3), можно выполнить эффективно, используя методы последовательного расчета. Начав со строки развертки, пересекающей одну из вершин многоугольника, можно последовательно получить значения интенсивности для других строк развертки, пересекающих сторону, соединенную с этой вершиной. Если грани многоугольника выпуклые, каждая строка развертки, пересекающая многоугольник, имеет два пересечения со стороной (точки 4 и 5 на рис. 3). После вычисления интенсивностей в двух точках пересечения строки развертки со стороной процедура последовательного расчета дает значения интенсивностей пикселей вдоль всей строки развертки

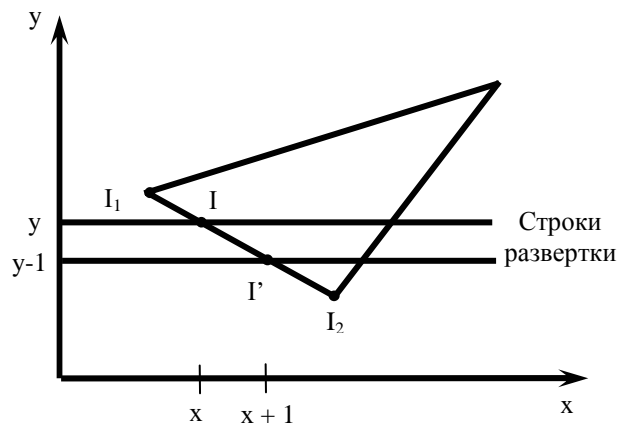


Рис. 4 - Последовательная интерполяция значений интенсивности вдоль стороны многоугольника для последовательных строк развертки

В качестве примера последовательного расчета интенсивностей рассмотрим строки развертки y и $y - 1$ на рис. 4, которые пересекают левую сторону многоугольника. Если строка развертки y — это следующая строка развертки под вершиной в точке y_1 с интенсивностью I_1 , т.е. $y = y_1 - 1$, то интенсивность I в строке развертки y можно вычислить по уравнению (2):

$$I = I_1 + \frac{I_2 - I_1}{y_1 - y_2} \quad (4)$$

Спускаясь вниз по стороне многоугольника, находим интенсивность вдоль этой стороны для следующей строки развертки $y - 1$:

$$I' = I + \frac{I_2 - I_1}{y_1 - y_2}, \quad (5)$$

Таким образом, для вычисления каждого последующего значения интенсивности вниз по стороне к предыдущему значению интенсивности просто прибавляется постоянный член $(I_2 - I_1)(y_1 - y_2)$. Подобные приросты используются для получения интенсивностей в последовательных горизонтальных положениях пикселей вдоль каждой строки развертки.

Визуализацию поверхностей по Гуро можно объединить с алгоритмом поиска невидимых поверхностей и заполнять только видимые многоугольники вдоль каждой строки развертки. Пример визуализации трехмерного объекта методом Гуро приведен на рис. 1, в.

Описанный метод интерполяции интенсивностей устраняет разрывы, присущие плоской визуализации, но имеет и свои недостатки. Блики на поверхности иногда отображаются с аномальными формами, а линейная аппроксимация интенсивности может давать на поверхности яркие или темные прожилки интенсивности, называемые *полосами возмущения* (Mach bands). Эти эффекты можно уменьшить при разделении поверхности на большее число многоугольных граней или использовании более точного расчета интенсивности.

Визуализация поверхности по Фонгу. Более точный метод интерполяции при визуализации многоугольной сетки разработал Фонг Буи Туонг (Phong Bui Tuong) [3, 4]. В данном подходе, названном *визуализацией поверхностей по Фонгу* или *визуализацией с интерполяцией вектора нормали*, интерполируются не значения интенсивностей, а векторы нормали. В результате получаются более точные значения интенсивностей, более реалистичные изображения бликов (светлых пятен) поверхности, и значительно уменьшается эффект полос возмущения. В то же время, метод Фонга требует больше вычислений, чем метод Гуро.

Каждая многоугольная область мозаичной криволинейной поверхности обрабатывается методом Фонга с использованием следующих процедур.

1. Определить средний единичный вектор нормали в каждой вершине многоугольника.
2. Используя нормали вершин, с помощью линейной интерполяции найти нормали во всех точках спроектированной области многоугольника.
3. Применить модель освещенности к точкам вдоль строк развертки и рассчитать интенсивности пикселей с использованием интерполированных векторов нормали.

Процедуры интерполяции для векторов нормали в методе Фонга идентичны процедурам поиска значений интенсивности в методе Гуро. Вектор нормали N на рис. 5 найдем с помощью вертикальной интерполяции векторов в вершинах 1 и 2:

$$N = \frac{y - y_2}{y_1 - y_2} N_1 + \frac{y_1 - y}{y_1 - y_2} N_2, \quad (6)$$

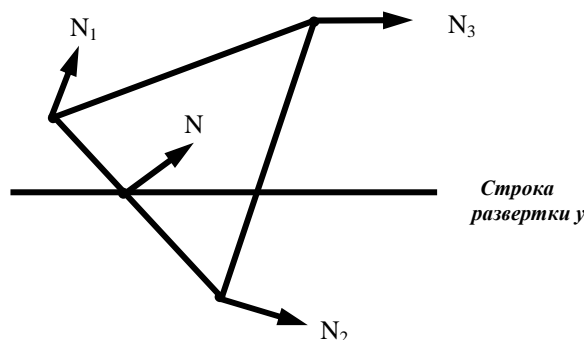


Рис. 5 - Интерполяция нормалей поверхности вдоль стороны многоугольника

Чтобы получить векторы нормали в последовательных строках развертки и последовательных положениях пикселей вдоль строк развертки, используются те же методы последовательного расчета. Разница между двумя подходами к визуализации поверхности состоит в том, что теперь, чтобы найти интенсивности точек поверхности, модель освещенности нужно применять в каждом пикселе проекции вдоль строк развертки.

Быстрая визуализация поверхности по Фонгу. Время обработки в методе Фонга можно сократить, аппроксимировав некоторые расчеты в модели освещенности. В *быстрой визуализации поверхностей по Фонгу* [1, 3, 4] интенсивности рассчитываются с использованием усеченного разложения в ряд Тейлора, а грани сетки имеют форму треугольных участков поверхности.

Поскольку в методе Фонга векторы нормали интерполируются по нормальным в вершинах, можно следующим образом записать выражение для расчета нормали к поверхности N в точке (x, y) , принадлежащей треугольному участку:

$$N = Ax + By + C. \quad (7)$$

Здесь векторы A , B и C определены по трем уравнениям вершин:

$$N_k = Ax_k + By_k + C, \quad k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

где через (x_k, y_k) обозначена вершина треугольника, спроектированная на плоскость пикселей.

Опуская параметры отражения и затухания, можно записать формулу для диффузного отражения света, излучаемого источником, от точки поверхности (x, y) :

$$I_{diff}(x, y) = \frac{L \cdot N}{|L||N|} = \frac{L \cdot (Ax + By + C)}{|L||Ax + By + C|} = \frac{(L \cdot A)x + (L \cdot B)y + L \cdot C}{|L||Ax + By + C|}. \quad (9)$$

Данное выражение можно переписать в следующей форме:

$$I_{diff}(x, y) = \frac{ax + bx + c}{[dx^2 + exy + fy^2 + gx + hy + i]^{\frac{1}{2}}}, \quad (10)$$

где такие параметры, как a , b , c и d , используются для представления различных скалярных произведений. Например,

$$a = \frac{L \cdot A}{|L|}. \quad (11)$$

Наконец, знаменатель в уравнении (6) можно разложить в ряд Тейлора и оставить члены до второй степени по x и y . В результате получим следующее:

$$I_{diff}(x, y) = T_5 x^2 + T_4 xy + T_3 y^2 + T_2 x + T_1 y + T_0, \quad (12)$$

где все T_k являются функциями различных параметров в уравнении (10), таких как a , b и c .

Если использовать правые разности, то после того, как определены исходные параметры правой разности, для вычисления уравнения (12) потребуется всего лишь два сложения на каждое положение пикселя (x, y) . Хотя упрощения в быстром методе Фонга сокращают требуемые расчеты, визуализация поверхности все еще требует примерно вдвое большего времени, чем визуализация по методу Гуро. Отметим, впрочем, что стандартный метод Фонга при использовании правых разностей требует примерно в 6-7 раз большего времени, чем визуализация Гуро.

Метод быстрой визуализации по Фонгу для диффузного отражения можно расширить и включить в него зеркальное отражение, для чего с помощью сходной аппроксимации вычисляются такие зеркальные члены, как $(N \cdot H)^{n_s}$ [3]. Кроме того, описанный алгоритм можно обобщить и включить в него конечную точку наблюдения и многоугольники с числом вершин, превышающим три.

Выводы. Метод Фонга сложнее, чем метод Гуро. Для каждой точки (пикселя) поверхности необходимо выполнять намного больше вычислительных операций. Тем не менее он дает значительно лучшие результаты, в особенности при имитации зеркальных поверхностей.

Метод Фонга позволяет получить более гладкое тонирование изображения, но в результате объем вычислений резко возрастает. Существует множество вариантов аппаратной реализации метода Гуро, которые позволяют получать изображение приемлемого качества, практически не увеличивая время закрашивания в отличие от метода Фонга. В результате в настоящее время метод Фонга используется только в тех системах, где не требуется формировать изображение в реальном масштабе времени.

Литература

1. Будаков В.П. Компьютерная графика – светотехнический проект на компьютере // Светотехника. – 1999. – №1. – с. 22-25.
2. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. – М.: Энергия, 1972
3. Эдвард Эйнджел. Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL, 2 изд.: Пер с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2001. – 592с.
4. Порев В.Н. Компьютерная графика. – СПб.: БХВ – Петербург, 2002. – 432с.

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЕФЕКТІВ ОСВІТЛЕННЯ ПОВЕРХНІ

Ю. О. Васильєва, О. М. Ляшенко

Розглядаються базові моделі освітлення і методи візуалізації освітлених поверхонь за допомогою алгоритмів рядків розгортки, що скорочують час обробки зображення.

VISUALIZATION OF EFFECTS ILLUMINATING THE SURFACE

U. O. Vasilyeva, E. N. Lyashenko

The base models of illumination and methods visualizing the lighted surfaces by application of the scan lines algorithms which abbreviate time of image treatment are highlighted.